

## ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ АМГ6

Л.М. Лобанов, М.О. Пашин, О.М. Тимошенко, П.В. Гончаров, О.Л. Міходуй, К.В. Шиян

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Досліджували вплив електродинамічної дії на довговічність зварних з'єднань з алюмінієвого сплаву АМГ6 при циклічному навантаженні. Встановлено, що електродинамічна обробка зразків стикових зварних з'єднань сплаву АМГ6 призводить до зниження рівня залишкових зварювальних напружень розтягу, що супроводжується їх переходом в стискання. Показано, що в результаті двосторонньої одноканальної електродинамічної обробки поверхні зварних з'єднань сплаву АМГ6 циклічна довговічність підвищується втричі у порівнянні з початковою. Додаткова електродинамічна обробка лінії сплавлення підвищує довговічність в п'ятеро у порівнянні з необробленим металом. При порівняльній оцінці одно- і двоканальної електродинамічної обробки зразків встановлено, що підвищення довговічності при використанні двоканальної схеми (в порівнянні з одноканальною) визначається керованою синхронізацією складових електродинамічного впливу, що виключає проходження імпульсу електричного струму через оброблюваний метал в фазі його затухання. Показано, що довговічність зразків, які оброблені по двоканальній схемі, при електроімпульсній дії, більш ніж на 50 % вище, ніж при динамічній, що пов'язано з внеском електропластичного ефекту в зниження рівня залишкових зварювальних напружень. Бібліогр. 8, табл. 4, рис. 5

*Ключові слова:* електродинамічна обробка, електродний пристрій, одно- і двоканальна схема, залишкові зварювальні напруження, алюмінієві сплави, довговічність, імпульс електричного струму, амплітуда циклу

Використання сучасних суднокорпусних і транспортних зварних конструкцій із сплавів на основі алюмінію потребує нових підходів до підвищення їх довговічності. Рішення проблеми гальмування розвитку втомного руйнування є актуальним для продовження ресурсу як нової, так і техніки, яка експлуатується [1].

Існує ряд ефективних способів підвищення опору втомі конструкційних матеріалів, заснованих на наведенні полів напружень стиску в зоні прогнозованого руйнування, до яких можна віднести високочастотну механічну проковку [2]. До способів підвищення втоми, що базуються на зниженні концентрації напружень, можна віднести обробку вершини тріщини імпульсними електромагнітними полями різної тривалості і конфігурації [3].

Одним з методів електроімпульсних впливів на зварні з'єднання є електродинамічна обробка (ЕДО) [4], результатами якої є зниження рівня залишкових зварювальних напружень розтягу, що супроводжується формуванням в зоні обробки шару металу з подрібненою структурою. Аналіз результатів [1-4] дає підстави вважати, що ЕДО може бути ефективним способом підвищення довговічності зварних з'єднань. В даний час відсутні дані про оцінку впливу ЕДО на довговічність зварних з'єднань.

Метою роботи було дослідження впливу електродинамічних дій на довговічність зварних з'єднань з алюмінієвого сплаву АМГ6 при циклічному навантаженні.

ЕДО зварного з'єднання виконували при використанні одноканальної і двоканальної схем електродного пристрою (ЕП).

**Одноканальний електродний пристрій.** Конструктивна схема одноканального ЕП представлено відповідно на рис. 1. ЕП забезпечує електричний контакт між розрядним контуром і оброблюваним металом по одному каналу, через який в останній вводиться імпульс електричного струму – ВЕТ. ЕП забезпечує можливість регулювання динамічного та електроімпульсного впливу електрода на метал. Робочим органом ЕП є електрод 1 (рис. 1, а), який закріплено в корпусі з латуні 2 гвинтом 3. Робоча поверхня електрода, яка контактує з металом 22, полірована і має радіус закруглення 15 мм. Корпус 2, жорстко пов'язаний з мідним 8 і сталевим (нержавіюча сталь) 7 дисками товщиною 3 і 5 мм, спільно з електродом 1 входять до складу ударного механізму (УМ).

УМ закріплений в двох тефлонових підшипниках ковзання 11, які дозволяють йому рухатися у вертикальному напрямку. Запобігання обертання УМ навколо власної вертикальної осі забезпечують два гвинта 4, які переміщуються в вертикальних канавках кільця 5.

Диски пов'язані з обоймою 12, в якій знаходиться котушка індуктивності 10, намотана мідною шиною 6,2×1,5 мм і має 18 витків. Між

мідним диском і обмоткою, завдяки геометрії обойми, витримується немагнітний зазор величиною 0,5 мм. Індуктивність котушки становить 14,66 мкГн. Обойма 12 закріплена на основі 13 гвинтами 20. Знизу до основи 13 гвинтами 21 і гайками 9 прикріплена нижня кришка 6, на внутрішній поверхні якої розташована гумова прокладка, призначена для демпфування електродинамічного удару по нижній кришці, коли електрод не спирається на метал. Для підключення ЕП до джерела імпульсного струму зверху на основі 13 розташовані клеми 16 і 17 (рис. 1, б). За допомогою клеми 16 здійснюється підведення імпульсного електричного струму (ІЕС)  $I$  до ударного механізму через гнучкий провід 15, а клемою 17 – комутація обмотки.

Одноканальний ЕП має два варіанти вклучення:

1) реалізація взаємодії електроімпульсного  $I$  і динамічного  $P$  впливів – ІЕС  $I + P$ ;

2) вплив тільки динамічного навантаження  $P$  – ІЕС  $P$  (рис. 1, а).

*Принцип роботи одноканального ЕП.* При взаємодії  $I$  і  $P$  до одного з виводів обмотки клеми 17 підключається плюсовий провід від джерела імпульсного електричного струму, інший вивід обмотки підключається клемою 16 до ударного механізму, а мінусовий дріт від джерела імпульсного електричного струму (ДІЕС) – до оброблюваного металу 22. Схема протікання ІЕС  $I + P$  показана суцільною стрілкою на рис. 1, а. При динамічному впливі провід від ДІЕС підключається до двох виводів клеми 17, а клема 16 не підключається. При цьому ІЕС  $P$  протікає у напрямку, який позначено пунктирною стрілкою на рис. 1, а. Дроти закріплені фіксатором 18, який кріпиться до основи 13 гвинтами 19. Зверху клемний відділ закритий кришкою 14, яка прикріплена до основи гвинтами 20, 23 і гайками 9.

Робота ЕП здійснюється наступним чином. ЕП впирається в метал торцем електрода і ви-

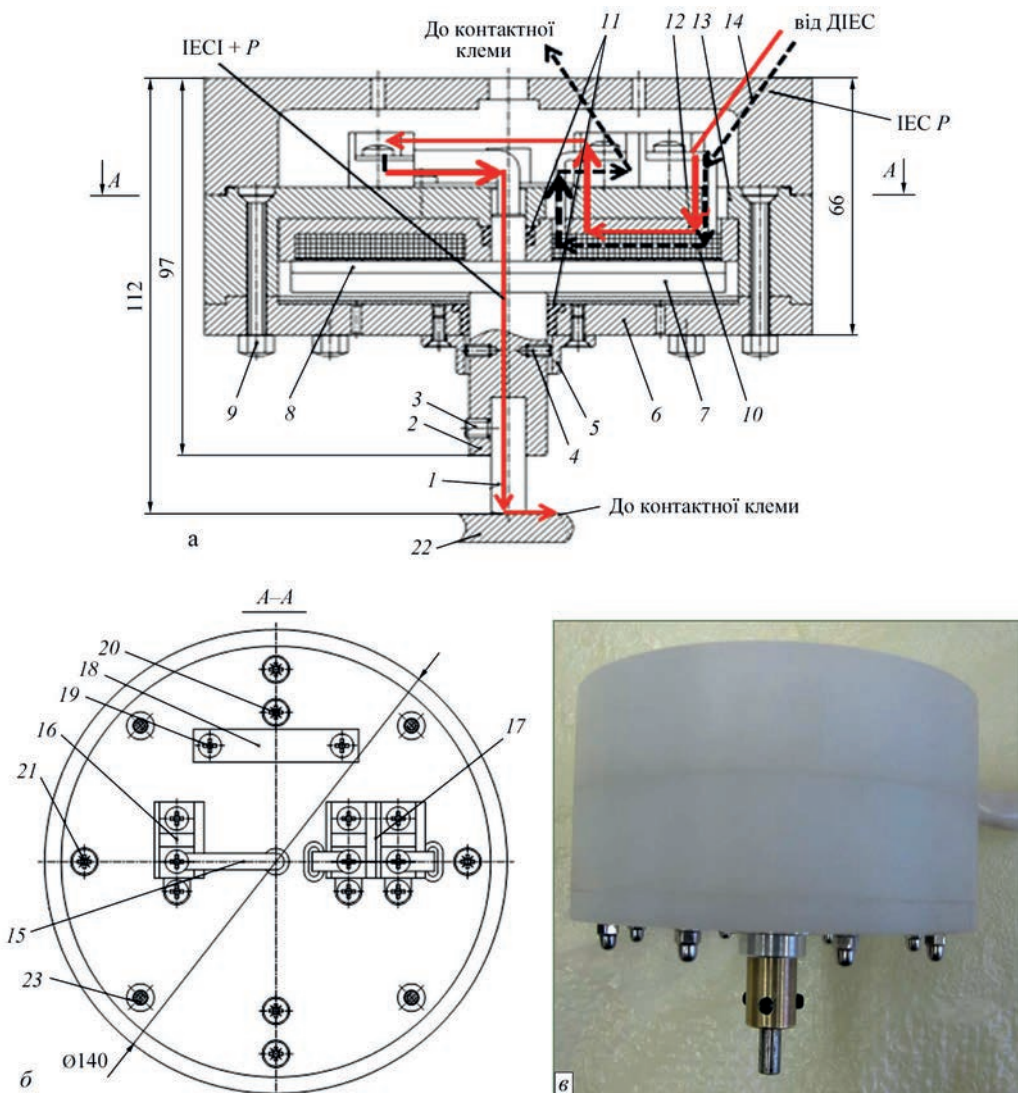


Рис. 1. Конструктивна схема одноканального електродного пристрою (ЕП) для ЕДО (пояснення в тексті): а – вигляд збоку, стрілками показано напрямок ІЕС; б – вид зверху; в – одноканальний ЕП для ЕДО

ставляється по нормалі до поверхні обробки. Для нормальної роботи ЕП з метою запобігання іскроутворення і оплавлення в місці контакту «електрод–метал» перед подачею ІЕС потрібно забезпечити гарантоване притиснення електрода до поверхні обробки.

При правильному позиціонуванні ЕП зусилля навантаження передається від обойми через ударний механізм на вольфрамовий електрод і призводить до притиснення електрода до поверхні металу. При протіканні ІЕС через котушку індуктивності  $I_0$  в диску  $\delta$  наводяться вихрові струми, які забезпечують спочатку відштовхування диска від котушки, а потім в кінці імпульсу – притягання до неї.

**Переваги одноканального ЕП.** Конструкція одноканального ЕП, що базується на схемі прямого пропускання ІЕС, має ряд переваг, до яких можна віднести простоту виготовлення пристрою і мінімальні втрати енергії в ньому при роботі джерела імпульсного струму в розрядному циклі. Особливостями конструкції ЕП з прямим пропусканням ІЕС через індуктор і електрод є менша тривалість імпульсу динамічного навантаження  $P$  в порівнянні з ІЕС –  $I$  (рис. 2, *a*), а також відсутність можливостей для керованої синхронізації електроімпульсного і динамічного впливів. Це звужує можливості управління процесом ЕДО, але компенсується простотою виготовлення і експлуатації ЕП.

З позицій електродинаміки ЕП із оброблюваним зварним з'єднанням, який включений в розрядне коло з джерелом живлення, представляється у вигляді магнітно-зв'язаних контурів, в первинне коло одного з яких включено ємнісний накопичувач енергії.

**Двоканальний електродний пристрій.** З метою усунення недоліку, властивого магнітно-пов'язаним контурам, розроблено і виготовлено двоканальний ЕП на базі магнітно-розв'язаних конту-

рів, який включає два незалежні канали ІЕС  $I$  та ІЕС  $P$ . Перший канал формує ІЕС  $P$  (рис. 2, *б*), який призначений для створення динамічного тиску на зону обробки і подається на котушку індуктивності ЕП. Другий канал формує ІЕС  $I$  (рис. 2, *б*), узгоджений за тривалістю з періодом динамічного тиску на зону обробки. ІЕС  $I$  подається безпосередньо на електрод ЕП і може передаватися в оброблюваний виріб. При цьому схема ЕП дозволяє відключати другий канал (ІЕС  $I$ ) і передавати на виріб тільки динамічний тиск. Електричне коло другого каналу замикається через контактний кабель, який закріплюється на виробі.

**Конструктивна схема двоканального ЕП.** Конструктивно двоканальний ЕП (рис. 3, *a*) складається з електрода  $1$ , закріпленого в обоймі  $3$  пристроями фіксації  $2$  і  $20$ . Обойма з'єднана з диском з неферромагнітного матеріалу  $16$ , який спирається на каркас  $6$  з розміщеною в ньому котушкою індуктивності  $14$  з вбудованим плоским індуктором  $15$ . Котушка закріплена на каркасі гвинтами  $11$ . Нижня стінка каркаса  $4$ , закріплена гвинтами  $5$ , виконує роль немагнітної підкладки під диском і демпфером  $17$ . Верхня (захисна) кришка  $9$  каркаса закріплена в корпусі ЕП гвинтами  $8$ . Підведення ІЕС  $I$  до котушки здійснюється проводом  $7$ . Замикання розрядного контуру, що забезпечує підведення ІЕС  $I$  до оброблюваного металу  $18$  здійснюється клемою  $19$ . ІЕС  $P$  проходить через котушку по дротах  $12, 13$ . Підводи  $7, 12, 13$  ЕП з'єднані з зовнішніми колами контактними клемми  $10$ .

**Принцип дії двоканального ЕП.** Робота двоканального ЕП при ЕДО здійснюється наступним чином. При протіканні імпульсного струму через котушку збуджується магнітне поле, яке ініціює в диску вихрові струми. Взаємодія наведених струмів з магнітним полем, яке їх ініціювало, призводить до виникнення електродинамічної сили. В першій фазі впливу електродинамічна сила притискає електрод до оброблюваного матеріалу, а в

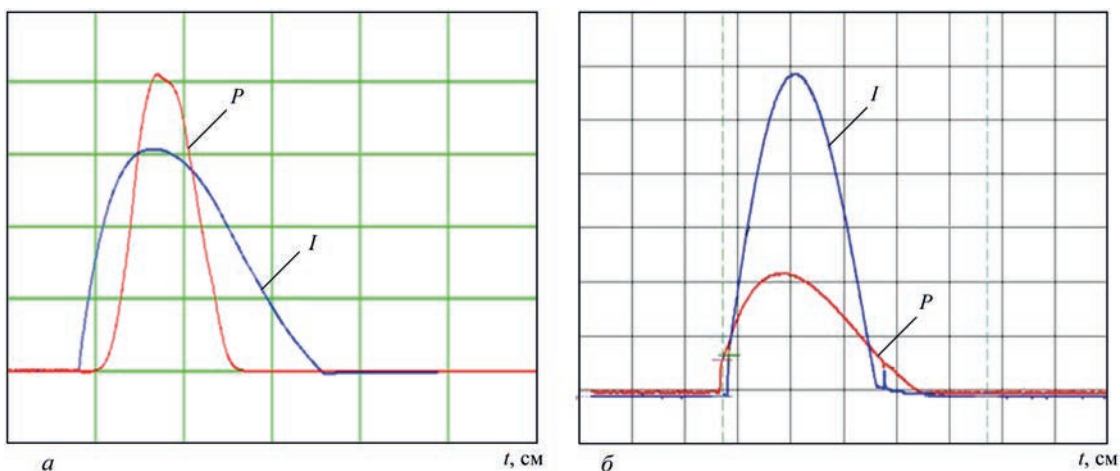


Рис. 2. Осцилограми динамічного тиску  $P$  та імпульсного струму  $I$ , який проходить через метал, що оброблюється, при одноканальній (*a*) та двоканальній (*б*) схемах ЕП

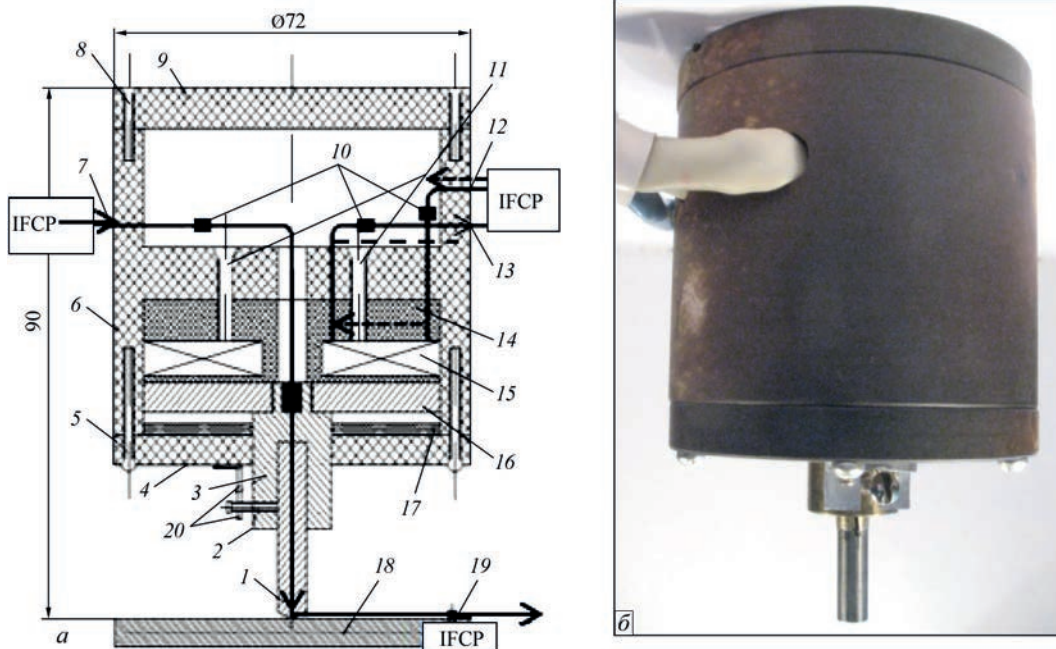


Рис. 3. Двоканальний електродний пристрій (ЕП) для ЕДО з незалежними каналами ІЕС: а – конструктивна схема, де стрілками показано напрямки ІЕС І та ІЕС Р (пояснення в тексті); б – зовнішній вигляд ЕП

другий напрямок силового впливу змінюється на протилежний – електрод відштовхується від оброблюваного матеріалу. Вплив імпульсного струму на зону обробки по тривалості не перевищує тривалість зусилля притискання (див. рис. 2, б). Конструкція ЕП підпорядкована вимогам погодженої тривалості імпульсів і виключення електроіскрових явищ в зоні обробки. Управління каналами в ЕП реалізовано на трьох мікроконтролерах та програмованій логіці, що дозволяє регулювати параметри імпульсів струму (амплітуду), затримку одного імпульсу по відношенню до іншого, візуалізувати параметри імпульсів на світловому дисплеї. Тривалість імпульсів по обох каналах визначається параметрами електричного кола розрядних контурів і може змінюватися дискретно шляхом додавання/зменшення їх індуктивності.

**Переваги двоканального ЕП.** Для забезпечення нормального режиму роботи ЕП, який виключає іскроутворення і оплавлення в місці контакту «електрод–зразок», визначали величину статичного завантаження, що забезпечує надійний струмовий контакт електрода з оброблюваною поверхнею. З цією метою створювали гарантоване статичне притиснення електрода 1 ЕП (рис. 1, а) до зовнішньої поверхні зразка 22, для чого використовували зварне з’єднання, показане на рис. 4. Від сили притиснення  $F_y$  істотно залежить величина електричного опору контакту «електрод-зразок»  $R_k$ . Для оцінки впливу  $F_y$  на зміни  $R_k$ , проводили вимірювання значень  $R_k$ , варіюючи  $F_y$  в діапазоні від 2 до 150 Н. З цією метою на зовнішню поверхню кришки 14 ЕП (див. рис. 1, а) встановлювали вантажі різної маси, а зміни значень  $R_k$  реєстрували на ділянці розряд-

ного контуру між електродом 1 та зразком 22, використовуючи вимірювальний міст (LC-метр) марки BR2876-5. Залежність опору контакту  $R_k$  від сили  $F_y$  статичного притискання електрода до зразка представлено в табл. 1, з якої видно, що при збільшенні  $F_y$  від 2 до 40 Н величина опору  $R_k$  інтенсивно знижується з 90 до 13 мОм. При подальшому збільшенні  $F_y$  до 150 Н  $R_k$  лінійно знижується до 10 мОм. Із даних табл. 1 можна зробити висновок, що збільшення  $F_y$  понад 40 Н незначним чином впливає на зміну опору в зоні контактної взаємодії. Це визначило вибір в подальших експериментах значення  $F_y$ , яке знаходилось в діапазоні 50...80 Н.

**Дослідження впливу ЕДО на опір втомі зразків зварних з’єднань сплаву АМг6.** Зразки товщиною  $\delta = 2$  мм (рис. 5) виконувалися автоматичним зварюванням TIG(Ar) при напрузі дуги  $U_{зв} = 20$  В, зварювальному струмі  $I_{зв} = 170$  А і швидкості зварювання  $v_{зв} = 5,5$  мм/с. Методом електронної спекл-інтерферометрії [5] до і після ЕДО визначали значення залишкових зварювальних напружень у центральному поздовжньому перетині зразка, відповідному лінії А-А на рис. 5. ЕДО виконували в напрямку «від центру до країв» (стрілка на рис. 5), застосовуючи електродний пристрій (ЕП), укомплектований вольфрамовим електродом марки ВЛ з напівсферичним робочим торцем, а режим ЕДО забезпечував запасену енергію накопичувача  $E_3$  до 600 Дж при одноразовому електродинамічному впливі.

Таблиця 1. Залежність опору контакту  $R_k$  від сили статичного притиснення електрода до зразка  $F_y$

$F_y$ , Н	2	3	10	15	22	40	80	150
$R_k$ , мОм	90	40	25	20	15	13	12	10

Обробку зразків виконували електродним пристроєм в умовах «жорсткого закріплення», для реалізації якого перед ЕДО обидві сторони зразка (рис. 5) «жорстко» фіксували розподіленим навантаженням на складальній плиті, виключаючи можливі кутові деформації зразка. Така схема фіксації оброблюваного металу, згідно [6], забезпечує максимальну ефективність електродинамічного впливу, при інших рівних параметрах режиму ЕДО. Обробку проводили при значенні індуктивності ЕП –  $L = 5,3$  мкГн і енергії  $E_3 < 1$  кДж. При виборі значень зарядної напруги  $U$  для двох схем ЕДО базувались на тому, що значення  $U_{I+P}$  для одноканальної схеми і сумарне  $U_I + U_P$  – для двоканальної, повинні бути рівними. Так, при одноканальній схемі використовували режим ЕДО, що задається  $U_{I+P} = 570$  В ( $I = 5,75$  кА) для ІЕС  $I + P$ , а при двоканальній –  $U_P = 200$  В ( $I_P = 1,45$  кА) для ІЕС  $P$  і  $U_I = 370$  В ( $I_I = 4,3$  кА) для ІЕС  $I$ .

Для реалізації електродинамічного впливу на робочу частину зразка в зоні ЕДО встановлювали ЕП і забезпечували його гарантований електричний контакт з оброблюваною поверхнею при замиканні розрядного контуру. Включення силового ключа ініціювало розряд ємнісного накопичувача енергії через ЕП в оброблюваний матеріал. В процесі виконання ЕДО серією ІЕС, ЕП переміщували по поверхні оброблюваної ділянки зразків в напрямку «від центру – до країв» (стрілка на рис. 5) з кроком 3...5 мм. У кожному циклі ЕДО виконували до 35 електродинамічних впливів, що забезпечувало рівномірне поверхневе електропластичне деформування оброблюваної ділянки шва (лінії сплавляння) довжиною 90 мм. Реалізовували різні схеми обробки зразків по одно- (рис. 1) і двоканальній (рис. 3) схемам ЕДО, які виконувались з боку зовнішньої поверхні шва і лінії сплавляння, а також з боку кореня шва.

Проводили втомні випробування зразків, оброблених за різними схемами ЕДО. Використовували машину марки УПМ-02 (рис. 4), що реалізує схему втомних випробувань на вигин (рис. 4, б) при симетричному циклі навантаження з частотою 14 Гц. Амплітуду напружень циклу  $\sigma_a$  задавали в діапазоні 80...160 МПа, а навантаження проводили протягом інкубаційного періоду [7] до реєстрації кількості циклів  $N$ , що відповідають початку руйнування зразків. Досліджували вплив різних схем ЕДО на циклічну довговічність  $N$  зразків.

**Аналіз отриманих результатів.** Розподіл  $\sigma_x$  до та після двосторонньої ЕДО центру шва по одноканальній схемі представлено в табл. 2. З таблиці вид-

но, що до ЕДО в центрі шва і на лінії сплавляння (в зонах можливого руйнування) пікові значення напружень, що розтягують, близькі до  $\sigma_{0,2}$  для сплаву АМг6, після обробки трансформувались в напруження стискання, значення яких досягали –10 МПа.

Значення напружень  $\sigma_y$  в центрі шва і на лінії сплавляння до ЕДО по одноканальній схемі досягали відповідно 12 і 17 МПа. Після ЕДО  $\sigma_y$  трансформувались в напруження стискання, значення яких в центрі шва і на лінії сплавляння досягали відповідно –68 та –56 МПа.

Особливості схем, розташування зон руйнування і значення  $N$  представлено в табл. 3. З її даних можна бачити, що в результаті двосторонньої ЕДО зовнішньої поверхні і кореня шва по одноканальній схемі ЕП, циклічна довговічність  $N$  зраз-

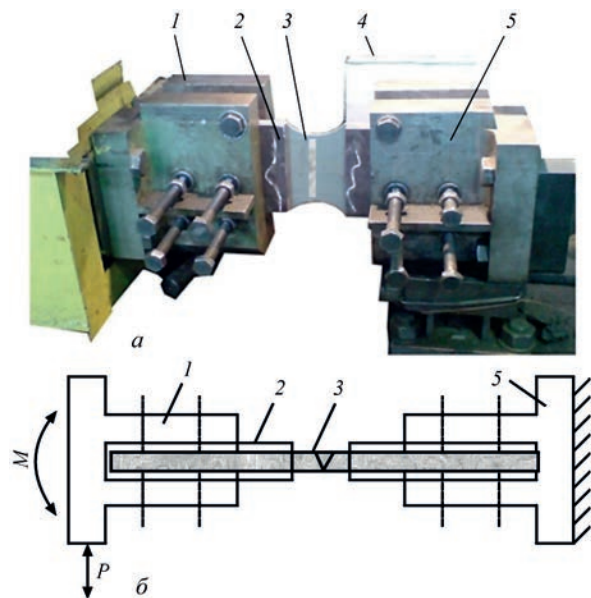


Рис. 4. Втомні випробування зразків зварних з'єднань сплаву АМг6 після ЕДО: а – зовнішній вигляд випробувальної машини УПМ-02 (1 – рухомий затискач; 2 – пластина, яка фіксує; 3 – зразок; 4 – лічильник циклів; 5 – нерухомий затискач); б – схема випробувань;  $P$  – горизонтальне навантаження;  $M$  – згинальний момент

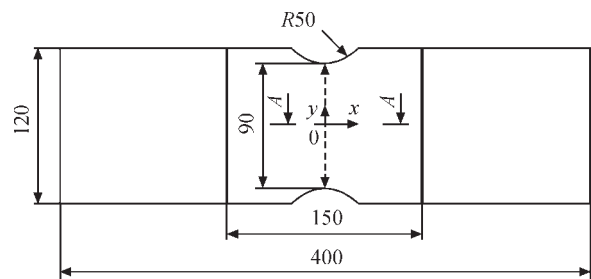


Рис. 5. Схема зразків зварного з'єднання зі сплаву АМг6 для втомних випробувань, де штрихова стрілка – напрямок ЕДО, А-А – переріз, в якому визначались напруження  $\sigma_x$  та  $\sigma_y$

Таблиця 2. Розподіл  $\sigma_x$  до та після ЕДО (рис. 5) по одноканальній схемі

$X$ , мм	0	5	11	16	25	36	46	56	66	76
$\sigma_x$ до ЕДО, МПа	120	130	100	40	-40	-38	-28	-21	-18	-10
$\sigma_x$ після ЕДО, МПа	-8	-9	-10	-10	5	18	15	11	2	-7

ків зварних з'єднань в досліджуваному діапазоні  $\sigma_a$  підвищується втричі (рядки 4, 7, 8) в порівнянні з вихідною (рядки 1–3). При цьому руйнування як вихідних зразків, так і оброблених, відбувається по лінії сплавлення. Дані табл. 3 для одноканальної схеми підтверджують результати випробувань на втому, які представлені в табл. 4.

Додаткова ЕДО основного металу на відстані 10 мм за лінією сплавлення (рядок 5) забезпечує більш розвинену зону напружень стискання в області прогнозного руйнування зразків. Збільшення зони стискання, яка створена в околі зварного з'єднання, не впливає на довговічність  $N$ . У той же час попереднє циклічне навантаження зразків до досягнення  $N_1 = 400000$  перед виконанням ЕДО (рядок 6) призводить до підвищення довговічності  $N$ . При порівнянні даних рядків 6 та 1 табл. 3 можна бачити, що попереднє циклічне стимулювання зразків підвищує показники довговічності втричі. Даний факт можна пояснити додатковою релаксацією залишкових зварювальних напружень, яка забезпечується попередніми ци-

клічним навантаженням зразків до значення  $N_1$ . Таким чином, ефективність ЕДО може бути підвищена при обробці зварних з'єднань, що експлуатуються при циклічних навантаженнях, у порівнянні із виготовленими.

Застосування двосторонньої ЕДО з використанням двоканальної схеми ЕП позитивно впливає на довговічність  $N$ , значення якої при  $\sigma_a = 160$  МПа після односторонньої і двосторонньої ЕДО шва підвищуються відповідно на 6 і 15 % (рядки 11 і 12 в табл. 3) в порівнянні з одноканальною (рядок 8). Зона руйнування при цьому зміщується в основний метал на 5...10 мм від лінії сплавлення. Порівняння рядків 8 і 12 є цікавим з огляду на той факт, що підвищення  $N$  при використанні двоканальної схеми досягалося за рахунок реалізації в два рази меншої кількості впливів, ніж при одноканальній (виключена ЕДО з боку кореня шва).

Додаткова ЕДО лінії сплавлення (рядок 13) вдвічі підвищує значення  $N$  у порівнянні з одноканальною обробкою тільки шва (рядок 8) та в'ятеро у порівнянні з вихідною (рядок 3). Підвищення

Таблиця 3. Значення довговічності  $N$  при різній амплітуді цикла  $2\sigma_a$  зварних з'єднань сплаву АМгб після ЕДО при одно- та двоканальній схемах ЕП

Номер серії зразків	Схема ЕДО	$2\sigma_a$ , МПа	$N$	Зони руйнування
1	Без ЕДО	80	525600	По лінії сплавлення
2	-"-	120	210600	-"-
3	-"-	160	151200	-"-
4	Одноканальна, двостороння (шов + корінь)	80	1004800	-"-
5	Одноканальна, двостороння (шов + корінь + ОМ з двох сторін на відстані 10 мм від лінії сплавлення)	80	970000	Основний метал (ОМ) за 2 мм від лінії сплавлення
6	Аналогічно № 5, перед ЕДО зразок навантажувався $N_1 = 400000$ при $\sigma_a = 80$ МПа	80	932000, з врахуванням $N_1 - 1332000$	По лінії сплавлення
7	Одноканальна, двостороння	120	568000	-"-
8	-"-	160	360600	-"-
9	Двоканальна: ІЕС I + ІЕС P (двостороння)	80	1169320	ОМ за 5 мм від лінії сплавлення
10	Двоканальна: ІЕС P (двостороння)	80	752400	По лінії сплавлення
11	Двоканальна ІЕС I + ІЕС P (одностороння-шов)	160	382000	ОМ за 10 мм від лінії сплавлення
12	Двоканальна: ІЕС I + ІЕС P (двостороння)	160	414000	Центр шва
13	Двоканальна: ІЕС I + ІЕС P (двостороння – шов+ лінія сплавлення)	160	718000	По лінії сплавлення

Таблиця 4. Результати випробувань на втому зразків зварних з'єднань сплаву АМгб (рис. 4) при  $\sigma_a = 80, 120$  и  $160$  МПа в координатах  $2\sigma_a - N$  для одноканальної схеми

Вихідний стан – до ЕДО							
$N$	520000	470000	460000	210000	150000	130000	140000
$2\sigma_a$ , МПа	80	80	80	120	160	160	160
Після ЕДО							
$N$	1000000	1050000	1040000	560000	360000	390000	392000
$2\sigma_a$ , МПа	80	80	80	120	160	160	160

значень  $N$  при використанні двоканальної схеми можна пояснити особливостями керованої синхронізації складових електродинамічного впливу, що виключає проходження ІЕС через оброблюваний метал в фазі притягання диску 16 до котушки 14 (рис. 3, а). При цьому виключається термічний вплив ІЕС в період розриву електричного контакту розрядного кола, що призводить до зміцнення обробленого металу до рівня вище основного. Наслідком цього є зміщення зони руйнування від лінії сплавлення в основний метал, що відображено в табл. 3 (рядки 9, 11).

Вивчали вплив струмової складової електродинамічного впливу (ІЕС  $I$ ) на довговічність  $N$  зварних з'єднань при ЕДО по двоканальній схемі ЕП. З цією метою досліджували зразки, які оброблені в умовах взаємодії електроімпульсного і динамічного впливів (ІЕС  $I$  + ІЕС  $P$  – рядок 9), а так само тільки при динамічному впливі (ІЕС  $P$  – рядок 10). З даних табл. 3 випливає, що значення  $N$  в умовах взаємодії більш ніж на 50 % вище, ніж при динамічному навантаженні. Даний факт можна пояснити внеском струмової складової ЕДО, що ініціює вклад електропластичного ефекту (ЕПЕ) [8] в зниження рівня залишкових зварювальних напружень. Вплив напружень на довговічність  $N$  особливо значний при багатоциклового навантаженні, якому відповідає  $2\sigma_a = 80$  МПа. Фактором, що визначає підвищення  $N$  при реалізації ЕПЕ, є також деформаційне зміцнення шва на основі електростимулювання, що пояснює зміщення зони руйнування від лінії сплавлення в основний метал.

Слід зазначити, що саме при малій амплітуді циклу  $2\sigma_a = 80$  МПа рівень залишкових зварювальних напружень найбільш впливає на величину  $N$ . При порівнянні вихідної  $N$  (рядок 1) з її значеннями, отриманими після ЕДО по одно- (рядок 5) та двоканальній (рядок 9) схемам ЕП, можна бачити домінування останньої в якості інструменту, що забезпечує найбільше підвищення  $N$ . В той же час попереднє циклічне навантаження, що сприяє зниженню рівня залишкових зварювальних напружень до початку ЕДО, забезпечує підвищення  $N$  у порівнянні зі зразками, обробленими без попереднього силового впливу. Даний факт дає підстави вважати, що попереднє навантаження є фактором підвищення довговічності зварних з'єднань при використанні ЕДО, що в перспективі може служити предметом спеціальних досліджень.

При порівнянні впливу на довговічність ЕДО по двоканальним схемами ЕП, що реалізують вплив ІЕС  $I$  (рядок 10) та ІЕС  $I$  + ІЕС  $P$  (рядок 9), можна побачити, що внесок дії струму збільшує  $N$ . При цьому збільшення вкладу струмової складової в електродинамічний вплив, яке виконано за схемою ІЕС  $I$  + ІЕС  $P$  та інтенсифікує прояв елек-

тропластичного ефекту, представляється перспективним і досить просто реалізованим на розглянутій елементній базі.

Проведені дослідження показали ефективність ЕДО сплаву АМг6 і його зварних з'єднань з метою підвищення опору руйнуванню при циклічних навантаженнях в умовах симетричного вигину. Застосування ЕДО основного металу [6], зварних з'єднань, а також елементів тонколистових конструкцій в зоні очікуваних руйнувань дозволить підвищити експлуатаційний ресурс виготовлених і експлуатованих виробів, що працюють в умовах циклічних навантажень.

## Висновки

1. Показано, що електродинамічна обробка (ЕДО) зразків стикових зварних з'єднань сплаву АМг6 призводить до зниження рівня залишкових зварювальних напружень розтягу, що супроводжується їх переходом в напруження стиску.

2. Встановлено, що в результаті двосторонньої одноканальної ЕДО поверхні зварних з'єднань сплаву АМг6 циклічна довговічність підвищується втричі у порівнянні з вихідною. Додаткова ЕДО лінії сплавлення підвищує довговічність в п'ятеро у порівнянні з необробленим металом.

3. За результатами порівняльної оцінки одноканальної і двоканальної ЕДО зварних з'єднань сплаву АМг6 встановлено, що підвищення довговічності при використанні двоканальної схеми (в порівнянні з одноканальною) визначається керованою синхронізацією складових електродинамічного впливу, яка виключає проходження ІЕС в фазі його загасання через метал, що оброблюється.

4. Встановлено, що довговічність зразків, які оброблені по двоканальній схемі, при електроімпульсній дії, більш ніж на 50 % вище, ніж при динамічній дії, що пов'язано з внеском електропластичного ефекту в зниження рівня залишкових зварювальних напружень.

## Список літератури

1. Кныш В.В. (2000) Определение циклической долговечности элементов конструкций при торможении усталостных трещин. *Автоматическая сварка*, **9-10**, 73–75.
2. Кныш В.В., Клочков И.Н., Пашуля М.П., Мотрунич С.И. (2014) Повышение сопротивления усталости тонколистовых сварных соединений алюминиевых сплавов высокочастотной проковкой. *Там же*, **5**, 22–29.
3. Финкель В.М., Иванов В.М., Головин Ю.И. (1983) Залечивание трещин в металлах скрещенным электрическим и магнитным полями. *Проблемы прочности*, **4**, 54–58.
4. Лобанов Л.М., Пашин Н.А., Соломийчук Т.Г. и др. (2012) Изменения структуры алюминиевого сплава АМг6 при электродинамических воздействиях. *Вісник українського матеріалознавчого товариства*, **5**, 30–42.
5. Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Савицкий В.В., Ткачук Г.И. (2006) Методика определения остаточных напряжений в сварных соединениях и элементах конструкции с использованием электронной спекл-интерферометрии. *Автоматическая сварка*, **1**, 10–13.

- Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Yashchuk, V.A., Mikhodui, O.L. (2015) Effect of Electrodynamic Treatment on the Fracture Resistance of the AMg6 Aluminum Alloy Under Cyclic Loading. *Strength of Materials*, **3**, 91–98.
- Яковлева Т.Ю. (2003) *Локальная пластическая деформация и усталость металлов*. Киев, Наукова думка.
- Баранов Ю.В., Троицкий О.А., Аврамов Ю.С. (2001) *Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы*. Москва, МГИУ.
- Finkel, V.M., Ivanov, V.M., Golovin, Yu.I. (1983) Crack healing in metals by crossed electric and magnetic fields. *Problemy Prochnosti*, **4**, 54–58 [in Russian].
- Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Solomijchuk, T.G. et al. (2012) Changes of structure of AMg6 aluminium alloy in electrodynamic effects. *Visnyk Ukrainського Material. Tovarystva*, **5**, 30–42 [in Russian].
- Lobanov, L.M., Pivtorak, V.A., Savitsky, V.V., Tkachuk, G.I. (2006) Procedure for determination of residual stresses in welded joints and structural elements using electron speckle-interferometry. *The Paton Welding J.*, **1**, 10–13.
- Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Yashchuk, V.A., Mikhodui, O.L. (2015) Effect of electrodynamic treatment on the fracture resistance of the AMg6 aluminum alloy under cyclic loading. *Strength of Materials*, **3**, 91–98.
- Yakovleva, T.Yu. (2003) *Local plastic deformation and fatigue of metals*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
- Baranov, Yu.V., Troitsky, O.A., Avramov, Yu.S. (2001) *Physical principles of electropulsed and electroplastic treatments and new materials*. Moscow, MGU [in Russian].

## References

- Knysh, V.V. (2014) Determination of cyclic life of structure elements in arresting fatigue cracks. *The Paton Welding J.*, **9-10**, 69-71.
- Knysh, V.V., Klochkov, I.N., Pashulya, M.P., Motrunich, S.I. Increase of fatigue resistance of sheet welded joints of aluminium alloys using high-frequency peening. *Ibid.*, **5**, 22–29.

## INCREASE IN THE LIFE OF WELDED JOINTS OF AMG6 ALUMINUM ALLOY

L.M. Lobanov, M.O. Pashchyn, O.M. Tymoshenko, P.V. Goncharov, O.L. Mikhoduj, K.V. Shiyan

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

The effect of electrodynamic action on the life of welded joints of AMg6 aluminum alloy under cyclic loading was investigated. It was found that electrodynamic treatment of specimens of butt welded joints of AMg6 alloy results in reduction in residual tensile welding stresses, which is followed by their transition to compression. It is shown that as a result of double-sided single-channel electrodynamic surface treatment in welded joints of AMg6 alloy, the cyclic life is three times increased as compared to the initial one. Additional electrodynamic treatment of the fusion line increases the life by five times as compared to the non-treated metal. In the comparative evaluation of single- and two-channel electrodynamic treatment of samples, it was found that the increase in life when using a two-channel scheme (as compared to single-channel) is determined by the controlled synchronization of components of electrodynamic effect, which eliminates the passage of electric current pulse through its treated metal in the phase of its attenuation. It was shown that the life of two-channel treated specimens with electric pulsed action is more than 50% higher than that of the dynamic ones, which is connected with the contribution of electroplastic effect to the reduction of residual welding stresses. 8 Ref. , 4 Tabl. , 5 Fig.

*Keywords:* electrodynamic treatment, electrode device, single- and two-channel scheme, residual welding stresses, aluminum alloys, life, electric current pulse, cycle amplitude

Надійшла до редакції 13.03.2020

ВЕДУЩАЯ ВЫСТАВКА В МИРЕ  
СВАРКА • РЕЗКА • ОБРАБОТКА

SCHWEISSEN  
& SCHNEIDEN  
No. 1  
IN THE WORLD

LET'S JOIN  
THE WORLD!

13.-17. сентября 2021

РЕГИСТРИРУЙТЕСЬ  
СЕЙЧАС!